

УДК 539.61

Современное представление о возможных механизмах адгезии металлических пленок к различным подложкам

А. Г. Шауцуков

Кабардино-Балкарский государственный университет, г. Нальчик, Россия

Рассмотрены характеристики межфазного взаимодействия на границе металл—металл, металл—диэлектрик; природа и механизм контактного взаимодействия металла с различными подложками; закономерности адгезионных процессов; влияние различных факторов на величину адгезии.

Исследование характеристик межфазного взаимодействия на границе металл—металл, металл—диэлектрик, металл—полупроводник, выявление природы и механизма контактного взаимодействия металла с различными подложками, установление закономерностей адгезионных процессов, влияние различных факторов на величину адгезии — это задачи, решение которых необходимо для совершенствования технологии формирования систем металлизации изделий электронной техники.

Вопросы адгезии металлических пленок к различным подложкам мало освещены в литературе. В первую очередь это связано, по-видимому, с экспериментальными трудностями определения истинной величины адгезии металлических пленок к подложкам.

Измерение ее существующими методами не представляется возможным. При использовании метода отрыва пленок определяется величина адгезионной прочности, которая не равна адгезии. Только в случае адгезии жидкости к различным подложкам удастся определить равновесную работу адгезии по значениям поверхностного натяжения жидкости и краевого угла смачивания. Эти величины поддаются непосредственному и достаточному измерению.

Данные по смачиванию имеют большое значение для выявления природы и механизма адгезионного взаимодействия. Хорошая смачиваемость твердых поверхностей жидким металлом означает также высокую адгезию жидкости к этим твердым материалам. Вместе с тем последнее, вообще говоря, еще не определяет однозначно высокую механическую прочность сцепления отвердевшего жидкого металла с твердой поверхностью. В работах Б. В. Дерягина и др. [1, 2] подчеркивается, что адгезию полимер—твердое тело невозможно трактовать чисто термодинамически и напрямую связывать со смачиваемостью твердого тела жидким полимером. Однако в системах, содержащих жидкости с высокой поверхностной энергией, к которым относятся металлические расплавы, работа адгезии при переходе от несмачивания к смачиванию отличается очень резко — от сотен до нескольких тыс. дин/см. Для таких резко отличающихся

случаев, по-видимому, можно ожидать наличия среднестатистической корреляции между адгезией жидкость—твердое тело и прочностью связи этих же веществ в твердом состоянии.

Таким образом, можно утверждать, что высокое значение адгезии жидкого металла всегда предпочтительнее для осуществления прочного соединения напыленной металлической пленки с подложкой.

На основании изложенного ниже будут широко использоваться данные по смачиванию в системах металл—металл, металл—окисел наряду с результатами, полученными с помощью методов, основанных на отрыве пленок.

При рассмотрении возможных механизмов адгезии в системах металл—металл, металл—окисел их следует разделять на неравновесные системы, в которых химические потенциалы компонентов не равны ($\mu_i^1 \neq \mu_i^2$), и равновесные системы ($\mu_i^1 = \mu_i^2$). К последним, в частности, относятся так называемые невзаимодействующие системы (полная несмачиваемость в твердом и жидком состояниях).

Как правило, для систем, находящихся в равновесном состоянии, часто обнаруживается плохая адгезия. Атомы металла пленки этих систем рассматриваются как бы физически сорбированными на подложке, и адгезия определяется силами Ван-дер-Ваальса. Для невзаимодействующих систем предложена еще одна концепция объяснения адгезии. Если материалы с разными свойствами первоначально контактируют между собой, то заряды, находящиеся на них, будут обуславливать электростатическое притяжение между поверхностями. При отдалении таких материалов друг от друга совершается работа по преодолению этих сил [3, 4].

Для неравновесных систем силы адгезии велики и определяются образованием химических связей. Вейль [5] предположил, что могут иметь место три различных случая хемосорбции, а именно:

- 1) эпитаксиальное или ориентированное выращивание;
- 2) формирование промежуточного слоя, который допускает непрерывный переход от одной решетки к другой;
- 3) образование металлической пары пленка—ионная подложка, в которой основное значение имеют

силы зеркального отображения.

Второй из этих случаев оказывается наиболее приемлемым, и разные исследователи считают его основной причиной адгезии.

Адгезия в системе металл—металл

Прежде чем перейти к анализу отдельных экспериментальных работ, необходимо отметить одну весьма общую закономерность — значительное увеличение адгезии с образованием переходного слоя в результате диффузии одного металла в другой, образования на границе раздела интерметаллидов или растворения металла подложки в металле пленки.

Используя метод царапания, удалось установить, что адгезия алюминия, осажденного на предварительно нанесенную на стекло хромовую пленку, увеличивается во времени в процессе вылеживания при комнатной температуре [6]; в некоторых случаях за 300—400 ч она увеличилась на порядок. Аналогичные результаты были получены для алюминия, нанесенного на подслои никеля, или нихрома на стекле [7], для пленок серебра, меди, нанесенных на подслои хрома на стекле [8].

Такие изменения во времени объясняются взаимодействием на поверхности раздела металл—металл и образованием переходного слоя из промежуточных сплавов.

Д. Келлер [9] показал, что адгезия между различными металлами должна зависеть от знака изменения энергии смещения при образовании атомных связей. Некоторые пары металлов с отрицательным знаком изменения энергии смещения ΔH_{disp} могут иметь хорошую адгезию (например, Fe—Al, Cu—Ag, Ni—Cu, Ni—Mo), в то время как для пар с положительной величиной ΔH_{disp} способность к смешиванию не проявляется, и адгезия минимальна.

Связь адгезии с интенсивностью и характером межметаллического взаимодействия иллюстрируют также исследования смачивания на сплавах. Так, олово, добавленное к свинцу, резко увеличивает смачивание свинцом стали и железа [10] (олово и железо образуют прочный интерметаллид); натрий уменьшает межфазную поверхностную энергию на границе жидких свинца и цинка от 128 до 82 дин/см при содержании 0,3 % натрия в свинце [11] (цинк и натрий также образуют интерметаллид $Zn_{13}Na$). Никель, добавленный к свинцу (концентрация 0,1 %), делает стабильным покрытие на железе и меди [12] (никель с медью и железом образует твердые растворы).

Из приведенных данных несомненна связь адгезии в металлических системах с интенсивностью и характером межметаллического взаимодействия и свойствами компонентов в контактирующей паре.

С другой стороны, согласно данным, полученным в работах [13, 14], а также из практики работ по многослойной металлизации следует, что контактное поведение металла пленки по отношению к металлу подложки определяется и наличием на подложке пленки окисла, препятствующей истинному контакту металлов.

Ю. В. Найдич [13] показал, что при непрерывном нагреве в контакте молибдена с оловом в вакууме ($2—3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. или водороде, а также железа со свинцом в водороде смачивание наступает при температуре выше 750 и 630 °С, соответственно. При температурах ниже этих "критических", краевые углы велики и достигают

значений 120—130°. После предварительного отжига молибдена и железа, выполненного, соответственно, при температурах выше 750 и 630 °С, может быть достигнуто смачивание (значение краевого угла 15—40°) и при низких температурах 300—400 °С. До обработки при этих температурах наблюдались большие значения краевых углов. Очевидно, отжиг молибдена в вакууме или водороде и железа в водороде устраняет адсорбционные окисные пленки, как правило, имеющиеся на поверхности этих металлов.

Окислы молибдена летучи в вакууме и восстанавливаются водородом. Окислы железа легко восстанавливаются водородом. В пользу окисной природы этих пленок говорит также описанный автором эксперимент с системой железо—свинец. Кратковременное воздействие атмосферного воздуха на термически очищенную поверхность железа ухудшает смачивание, и для его восстановления нужна повторная термообработка в среде водорода.

Таким образом, несмачивание, а значит, и плохая адгезия в системах олово—молибден и свинец—железо в значительной степени или даже полностью обуславливаются наличием пленок окислов, мешающих непосредственному контакту металлов.

При совершенном контакте чистых (не содержащих окислов на поверхности) молибдена и олове, железе и свинце адгезия достаточно высока несмотря на отсутствие растворимости между металлами в этих системах, т. е. взаимодействие между твердым и жидким металлами в контактном слое даже для не взаимодействующих систем достаточно для обеспечения хорошей адгезии. Этот вывод, являющийся принципиально важным, по-видимому, имеет общее значение для всех случаев адгезии в системах металл—металл. Большой интерес в этом плане представляют теоретические расчеты, выполненные в работах [15, 16].

С. Н. Задумкин с сотрудниками [15] провел вычисление поверхностной межфазной энергии при простом, но совершенном контакте металлов, без учета диффузии, растворения или образования интерметаллидов, т. е. равновесной части межфазной энергии. Оценка равновесной работы адгезии по полученным значениям межфазной энергии показала, что адгезия в этом случае близка к работе когезии.

А. И. Губановым [16] была рассчитана равновесная часть работы адгезии для 25 пар металлов — простых и переходных — в любых сочетаниях, с решетками одинакового и различного типов. Для всех пар металлов, кроме Al—W и Al—Mo, значение энергии адгезии оказалось больше 100 эрг/см².

Оценка межфазной энергии в межметаллических системах, выполненная в работах С. П. По-пеля и В. В. Павлова [17] на основе выведенного ими ранее уравнения для поверхностного натяжения,

относящегося, очевидно, к равновесной части межфазного натяжения, также свидетельствует о высокой степени адгезии в рассматриваемых системах.

Исследованиями по адгезии ювенильных поверхностей металлов установлено, что механически прочное соединение возникает в самом процессе приведения их в непосредственный контакт при комнатной и более низких температурах [18].

На основании приведенных данных можно утверждать, что совершенный контакт двух металлов в силу металлических свойств обоих достаточен для обеспечения высоких значений работ адгезии.

Но при таком подходе неясна указанная выше связь адгезии в металлических системах с интенсивностью и характером взаимодействия компонентов контактной пары. Совместимость этих двух факторов нуждается в специальном рассмотрении и, как будет показано ниже, они не исключают друг друга.

Окисная пленка между двумя взаимодействующими металлами, увеличивая расстояние между контактирующими поверхностями, исключает перекрытие электронных орбит пограничных атомов и резко ослабляет межметаллическое взаимодействие. Важно также то, что система металл—окисная пленка—металл остается стабильной, поскольку нет тенденции к обмену атомов между фазами ($\mu_i^1 = \mu_i^2$). Адгезия в таких системах определяется адгезией металла пленки к окислу металла подложки.

Иное положение наблюдается для неравновесных систем. В этом случае адгезия может увеличиваться в результате образования переходного слоя за счет диффузии одного металла в другой, образования интерметаллидов на границе раздела, растворения металла подложки в металле пленки, т. е. вовлечения во взаимодействие более глубоких слоев металла. Даже при наличии окисной пленки между контактирующими поверхностями такая система, тем не менее, является неустойчивой. Один или оба металла стремятся проникнуть через пленку, так как $\mu_i^1 \neq \mu_i^2$. Такое проникновение — спонтанное или инициированное — наблюдалось в опыте, описанном в [19].

По [20] возможен своеобразный туннельный механизм прохождения атома металла через окисный слой достаточно малой толщины. Возможно и просто растворение окисла в одном из металлов. Такое взаимопроникновение металлов навстречу друг другу сопровождается уменьшением энергии системы и снижением разности химических потенциалов компонентов. Эти процессы не могут происходить в равновесных системах.

Исходя из вышесказанного становится ясной связь адгезии с характером и интенсивностью взаимодействия между металлами, с одной стороны, и влиянием окисных и иных прослоек на контактной поверхности — с другой. Оба эти фактора действуют совместно.

Адгезия в системе металл—окисел

Установлено, что значения энергии адгезии между металлической пленкой и диэлектрической подложкой могут изменяться от десятых долей до нескольких

электронвольт. Как правило, слабая адгезия в таких системах наблюдается для металлов, имеющих слабое сродство к кислороду (Au, Ag). Для них адгезия определяется силами Ван-дер-Ваальса. Атомы этих металлов рассматриваются как бы физически сорбированными на подложке. Ф. Лондон [21] показал связь энергии адсорбции атома металла пленки и атома поверхности подложки

$$E = \frac{3\alpha_1\alpha_2 h^2 v_1 v_2}{2S^{6(v_1+v_2)}}, \quad (1)$$

где α_1 и α_2 — поляризуемости двух атомов;

v_1 и v_2 — характеристические частоты колебаний атомов;

h — постоянная Планка;

S — равновесное расстояние между атомом конденсата и поверхностью.

Точная оценка E из уравнения (1) затруднена, поскольку так называемые характеристические энергии $h\nu_1$ и $h\nu_2$ двух материалов неизвестны. Однако, как было показано Ф. Лондоном [22], в первом приближении могут быть использованы потенциалы ионизации U_1 и U_2 , так что уравнение (1) может быть записано в виде

$$E = \frac{3\alpha_1\alpha_2}{2} \frac{U_1 U_2}{S^6 U_1 + U_2}. \quad (2)$$

Дисперсионная энергия связи металла и окисла может быть оценена путем учета взаимодействия ближайших атомов, лежащих в первых контактирующих атомных плоскостях металла и окисла с использованием для энергии парного взаимодействия атомов формулы (2). Такая оценка была проведена в работе [23]. Полученные теоретические значения сил Ван-дер-Ваальса находятся в соответствии с экспериментальными величинами.

Б. Батесон [24] для объяснения высокой адгезии к стеклу различных легко окисляющихся металлов (например Cr, Al) допускал формирование слоя промежуточного окисла. Роль образования окисла в пленке, сформированной распылением или напылением, вероятно, лучше всего показана в работе Мэйссла и Шейбла [25], в которой исследовалось обратное распыление тантала. Когда на анод, на котором располагалась подложка, подавали небольшое отрицательное смещение относительно корпуса, подложка подвергалась бомбардировке небольшим количеством положительных ионов, что приводило к удалению окисла и других примесей с поверхности стекла и выращиваемых пленок. Адгезия пленок, полученных в таких условиях, оказывалась плохой. Это явление можно устранить, если начальный этап распыления производить при положительном смещении на аноде (+20 В), что приводит к образованию слоя с окисной связью и хорошей адгезией, а остальной процесс вести при большом отрицательном напряжении смещения (–100 В).

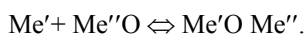
Подобные результаты были получены при распылении молибдена на окисленный кремний [26]. Маттокс [27] показал, что образование окисла может способствовать улучшению адгезии золота к кварцевому стеклу. Его установка позволяла осуществ-

лять высокочастотную очистку поверхности окиси кремния и триодное распыление золота в атмосфере с различным содержанием кислорода.

На основании работ Кингери, Найдича, Попеля, Вейля можно достаточно обоснованно утверждать, что адгезия в системе металл—окисел растет с ростом сродства металла пленки к кислороду. Кроме того, необходимо учитывать свойства второго компонента — окисла.

Можно считать, что химическое взаимодействие металла с окислом тем сильнее, чем менее прочной является связь между атомами металла и кислорода в окисле. В работе [13] было показано, что окисел с высокой электропроводностью, являющийся, как правило, соединением с меньшей энтальпией образования, лучше смачивается жидкими металлами; при рассмотрении адгезии пленок Mo и W, осажденных на SiO₂ и Al₂O₃, установлено, что адгезия W и Mo к SiO₂ больше, чем к Al₂O₃. К. Е. Волков и др. [28] нашли, что окисел SiO₂ лучше, чем Al₂O₃, смачивается сплавами железа и марганца. Свободная энергия образования окислов SiO₂ и Al₂O₃ в расчете на один моль кислорода равна, соответственно, 94,0 и 120,7 ккал. Таким образом, адгезия металлов к окислу растет с уменьшением термодинамической стабильности окисла, т. е. с уменьшением сродства к кислороду металла, образующего этот окисел.

На основании приведенных фактов можно утверждать, что величина адгезии для случая химического взаимодействия металла пленки и окисла тем больше, чем меньше разница химического сродства к кислороду металла пленки (Me') и металла окисла (Me''), и определяется интенсивностью протекания на границе раздела обменной реакции типа



Определяющей стадией взаимодействия металла и окисла является взаимодействие металла (Me') с кислородом окисла.

В результате реакции кислород может переходить в металл, либо образуя слой промежуточного окисла, либо растворяясь в нем. В обоих случаях имеет место контакт образовавшегося металлокислородного сплава и поверхности окисла. Механизм сцепления металл—окисел остается при этом неясным. Важными для понимания этого механизма являются исследования контактных процессов в системе твердый окисел—жидкий металлический расплав, содержащий кислород, проведенные Найдичем [13].

Он показал, что кислород, добавленный в металлы Ni, Cu, Ag, вызывает резкое снижение поверхностного натяжения металла и увеличивает адгезию этих металлов к окислам.

Аналогичное влияние кислорода найдено для сплавов Fe—O [29]. Кислород способствует увеличению адгезии золота к поверхности кварца [30], увеличивает адгезию напыленных на стеклянную поверхность пленок свинца, никеля, железа, молибдена, золота, меди, цинка и других металлов [31].

К этому классу явлений нужно отнести и наблюдавшееся улучшение связи металл—керамика для сис-

темы Al₂O₃—Mo [32] при введении в металл кислорода из атмосферы.

Сущность адгезионного действия кислорода заключается в оттягивании и принятии валентных электронов металла, в результате чего образуются положительные ионы металла, соединяющиеся затем ионной связью с анионами кислорода окисла [13]. В таком случае роль кислорода неспецифична, его может заменить другой металлоид, имеющий достаточное сродство к электрону.

Ф. Ф. Волькенштейн [33, 34] рассмотрел возможность образования связи путем затягивания электронного облака взаимодействующего атома металла в решетку ионного соединения. В этом случае образуется связь типа связи в ионизированной молекуле H₂⁺. Однако такая связь, по оценкам самого автора, весьма слабая (с энергией того же порядка, что и энергия физической связи).

При повышении температуры происходит локальная диссоциация окисла. Контактная с окислом, атом металла может, заполнив своими валентными электронами вакантное место, связаться прочной ионной связью с поверхностью окисла, достраивая его решетку. Дальнейшая судьба иона кислорода после образования его связи с металлом может быть различна. Если происходит частичная диссоциация связи металл—окисел в окисле, ион кислорода, оставаясь на поверхности, насыщается валентным электроном атома металла и является связующим мостом между металлом и окислом.

При полной диссоциации связи в окисле и полном освобождении атома кислорода, последний может перейти в металл, предварительно локализовав на себе валентные электроны металла. Положительно заряженный ион металла в этом случае адсорбируется на соседнем ионе кислорода окисла, а освобожденный ион кислорода уже со стороны металла закрепляется на металлическом ионе. Во всех случаях со стороны металлической фазы образуется переходный слой соответствующего окисла металла, достраивающего решетку окисла подложки.

Однако в случае заранее имевшихся ионов металла Me⁺⁺ связь металла и окисла осуществляется легко. Для чистого металла и окисла требуется дополнительная затрата энергии на диссоциацию окисла.

Следует отметить, что в случае систем металлическая пленка—окисел, полученных в реальных промышленных условиях, адгезия зависит не только от сродства металла к кислороду, но и от других факторов: остаточного давления кислорода в камере напыления, структуры пленки, т. е. от тех параметров, которые влияют на образование промежуточного окисного слоя. Механизм возникновения промежуточного слоя в этом случае трактуется с позиции диффузии кислорода из различных источников (напылительная камера, металлическая пленка, окисел) к границе металл—окисел.

В работе [35] металлы по величине их адгезионного взаимодействия с окислами подразделяются на четыре группы.

Первая группа — это металлы, имеющие слабое сродство к кислороду (Au, Ag, Cu). Для них адгезия определяется силами Ван-дер-Ваальса.

Вторая группа объединяет металлы, имеющие большое сродство к кислороду (Zr, Mg, Mo, Ti, Fe, Cr, Ni). Пленки этих металлов имеют хорошую адгезию к окислам. Адгезия для них определяется образованием переходного слоя. Для таких металлов как Zr, Mg он образуется полностью в процессе осаждения, для других — формируется в процессе вылеживания, поэтому в них наблюдается временной рост адгезии.

В третью группу сведены металлы, имеющие низкую температуру плавления и для которых, несмотря на большое сродство к кислороду, наблюдается слабая адгезия. Для этих пленок непосредственный контакт с подложкой мал (Pb и Sn осаждаются в виде шариков), что и определяет слабую адгезию этих металлов.

В особую четвертую группу сведены Al и Mn. Неожиданно низкая адгезия алюминия связывается со структурой пленки. Считается, что структура пленок алюминия лишена заметных дефектов. Этот факт, а также наличие предварительной окисной пленки, по мнению авторов [35], препятствует проникновению газа через пленку, а увеличение адгезии со временем связано с кислородом, оставшимся в пленке.

Однако предложенная классификация адгезионных свойств в зависимости от сродства к кислороду и температуры плавления не лишена недостатков. Так, Mg и Al имеют близкую температуру плавления ($t_{Al} = 660^\circ\text{C}$, $t_{Mg} = 650^\circ\text{C}$), сродство к кислороду у магния меньше, чем у алюминия ($\Delta F_{O_2}^{Mg} = 145,8$ ккал/моль; $\Delta F_{O_3}^{Al} = 266,0$ ккал/моль), однако адгезия для алюминия меньше, чем для магния. Хром и молибден имеют сродство к кислороду много меньшее, чем алюминий, однако адгезия их на порядок больше. Поэтому связывать низкую адгезию алюминия только со структурой пленки недостаточно убедительно. Столь незначительная адгезия алюминия связана, по-видимому, скорее со структурой промежуточного слоя. Промежуточный слой в системе Si—SiO₂—Al состоит из SiO₂ и Al₂O₃ и твердого раствора алюминия в кремнии (α -фаза). Структура границы SiO₂—Al является многофазной с включениями мягкой α -фазы. В этом случае сила адгезии не может быть значительной [36].

В работе [36] также рассмотрены межфазные границы другого типа, часто встречающиеся в технологической практике: с интерметаллидным слоем для системы Zr—SiO₂ и "субокисным" переходным слоем в случае системы Cr—SiO₂. Окислы хрома по реакции $\text{SiO}_2 + \text{Cr} \rightarrow \text{Cr}_x\text{O}_y + \text{Si}$ не образуются. Однако экстраполяция зависимости изобарно-изотермического потенциала реакции между хромом и двуокисью кремния от количества атомов кислорода в окислах хрома $\Delta F(y)_{ky=0}$ показала, что при $y < 1$ значения изобарно-изотермического потенциала реакции переходят в область отрицательных величин. И, действительно, при электронографическом анализе пленок хрома, напыленных на стекло, при температуре 200 °C был найден окисел (Cr₃O) [37].

Таким образом, видно, что сила сцепления в системе металл—окисел определяется образованием переходного слоя. Механизм образования переходного слоя может быть различным. Он зависит как от

природы компонентов, так и от условий получения анализируемой системы.

В последние годы появился ряд работ, в которых сообщается об увеличении адгезии некоторых металлических пленок к стеклу после ионной бомбардировки [38—42].

Впервые на это явление обратили внимание авторы работы [38]. Они обнаружили, что при бомбардировке ионами аргона пленок алюминия на стекле адгезия в этой паре увеличивается в 40 раз.

Увеличение адгезии к стеклу после бомбардировки различными ионами наблюдалось также для пленок никеля [40], золота [41] и меди [39]. Степень увеличения адгезии для пленок различных металлов оказалась разной и минимальной в случае пленок золота. Различие в степени влияния бомбардировки на адгезию разных металлов может быть связано в первую очередь со степенью сродства металла к кислороду. Как отмечено выше, в системах окисно-активная металлическая пленка—окисел особую роль играют процессы окислообразования на границе раздела. По мнению авторов работы [39], скорость окислообразования при ионной бомбардировке должна повышаться за счет нарушения связей в подложке и диффузии освободившегося кислорода из подложки к границе раздела. Для окисно-неактивных металлических пленок адгезия возрастает за счет интенсификации взаимной диффузии атомов пленки и подложки [42].

Специфической особенностью ионной бомбардировки является то, что она сопровождается внедрением атомов пленки (атомов отдачи) в подложку, что приводит к образованию переходного слоя. Большинство авторов полагает, что именно образование переходного слоя за счет легирования атомами отдачи ответственно за увеличение адгезии после ионной бомбардировки.

Анализ литературных данных, приведенный выше, показал, что для обеспечения достаточной адгезии в системах металл—металл, металл—окисел физико-химическое взаимодействие металлических пленок между собой и подложкой должно быть интенсивным. С другой стороны, такое взаимодействие противоречит требованиям физико-химической стабильности контактных систем металлизации. Существующая в настоящее время технология их формирования не в состоянии разрешить указанное противоречие. Как было показано выше, весьма перспективно для улучшения адгезии металлических пленок к различным подложкам в системах металлизации использование ионной бомбардировки.

Литература

1. Дерягин Б. В. Проблемы адгезии//Вестник АН СССР. 1954. № 7. С. 10—29.
2. Выгоцкий Б. В., Дерягин Б. В. О несостоятельности чисто термодинамической трактовки явлений адгезии твердых тел//Коллоидный журнал. 1965. Т. 27. № 4. С. 624—626.
3. Смигла В. П. Электронная теория адгезии: Дис. ... канд. техн. наук. ИФХ АН СССР. — М., 1962.

4. Sinner S. K., Savage A. L., Rutzler I. E. Electrical phenomena in adhesion. I. Electron atmospheres in dielectrics//Appl. Phys. 1953. V. 24. P. 438—450.
5. Weyl W. A. The theoretical basis of adhesion//ASTM Proc. 1946. V. 46. P. 1506—1519.
6. Weaver C., Hill R. M. Adhesion of evaporated Aluminum films//Phil. Mag. 1958. V. 3. № 36. P. 1402—1410.
7. Weaver C., Hill R. M. Ageing of evaporated Aluminum films with under layers//Ibid. 1959. № 4. P. 253—266.
8. Weaver C., Hill R. M. Ageing effects in bimetallic films// Ibid. P. 1107—1125.
9. Keller D. V. Adhesion between solid metals//Wear. 1963. № 3. P. 353—365.
10. Фролов В. В. Явления смачивания металлических поверхностей жидкими несмешивающимися металлами//В сб.: Защита металлов от коррозии и образования накипи. — М.: Высшее ТУ им. Баумана. 1953. Т. 24. С. 48—61.
11. Гельд П. В., Чучмерев С. К. Межфазное натяжение на границе жидких несмешивающихся металлов//ДАН СССР. 1952. Т. 83. № 6. С. 877—884.
12. Bailey L. I., Watkins H. S. The flow of liquid metals on solid metal surfaces and its relations to soldering, brazing and not — dip coating//I. Inst. metals. 1951—1952. Т. 80. № 2. P. 57—76.
13. Найдич Ю. В., Костюк Б. Д., Колесниченко Г. А., Шайкевич С. С. Смачивание в системе металлический расплав—тонкая металлическая пленка—неметаллическая подложка//В сб.: Физическая химия конденсированных фаз, сверхтвердых материалов и границ их раздела. — Киев. 1975. С. 15—27.
14. Карашаев А. А., Задумкин С. Н. Межфазная поверхностная энергия на границе контакта разнородных металлов// В сб.: Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. — Нальчик, 1965. С. 79—84.
15. Губанов А. И. Теория адгезии двух любых металлов//ФММ. 1977. Т. 43. Вып. 1. С. 15—21.
16. Попель С. И., Павлов В. В., Кожурков В. Н., Немченко В. П. Некоторые вопросы теоретического и экспериментального исследования поверхностных явлений//В сб.: Поверхностные явления в расплавах. — Киев, 1968. С. 86—104.
17. Павлов В. В., Попель С. И., Есин О. А. Термодинамический расчет поверхностного натяжения растворов//В сб.: Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. — Нальчик, 1965. С. 46—60.
18. Wall A. I., Milner D. R. Wetting and spreading phenomena in vacuum//I. Inst. Metals. 1961—1962. V. 90. № 10. P. 394—402.
19. Adisson C. C., Adisson W. E., Kirridge B., Lewis I. Liquid metals, part IV. The wetting of zinc by liquid sodium. The significance of the critical wetting temperature//I. Chem. Soc. 1956. № 6. P. 1454—1461.
20. London F.//Z. Phys. Chem. 1930. B11. P. 222—227.
21. London F.//Trans. Faraday Soc. 1973. № 33. P. 8—11.
22. Behjamen P., Weaver C. Condensation energies for metals on glass and other substrates//Proc. Royl. Soc. 1959. A252. P. 418—430.
23. Bateson B. Sc. Aluminium reflecting films applied to glass and plastics//Vacuum. 1952. 11. 4. P. 365—376.
24. Maissel L. I., Shaible P. M.//I. Appl. Phys. 1965. V. 36. P. 237.
25. D'Heibe F. M. Resistivity and structure of sputtered molybdenum films//Trans. Met. Soc. A.I.M.E. 1966. V. 236. P. 321—326.
26. Mattox D. M. Influence of oxygen on the adherence of gold films to oxide substrates // J. Appl. Phys. 1966. V. 37. № 9. P. 3613—3615.
27. Kingery W. D. Role of surface energies and wetting in metal — ceramic seading // Amer. Cer. Soc. Bull. 1956. V. 35. № 3. P. 108—118.
28. Царевский Б. В., Попель С. И. Адгезия бинарных расплавов на основе железа к твердой окиси алюминия//В сб.: Поверхностные явления в металлах и сплавах и их роль в процессах порошковой металлургии. — Киев, 1961. С. 146—154.
29. Волков С. Е., Мчедмишвили В. А., Самарин А. М. Смачиваемость корунда и кварцевого стекла железомарганцевыми расплавами//ДАН СССР. 1963. 149. № 5. С. 1131—1133.
30. Thorton H. R. Bonding of gold to fused silica// Ceramics. 1959. V. 123. P. 10—11.
31. Benjamen P. Adhesion of metal films to glass//Proc. Poy. Soc. 1959. 254A. P. 177—183.
32. Helgesson C. I. Investigations of the bonding mehanism between metals and ceramics//Trans. Of chalmers univrity of technology Crotheuburg, Sweden. 1966. V. 311. P. 1—121.
33. Волькенштейн Ф. Ф. К теории активированной адсорбции//ЖФХ. 1953. 27. № 2. С. 159—166, 166—177.
34. Волькенштейн Ф. Ф. О двух типах гомеоплярной связи при химической адсорбции//Там же. 1954. 28. № 3. С. 422—432.
35. Benjamin P., Weaver C. The adhesion evaporated metal films on glass//Proc. Roy. Soc. 1962. 261A. P. 516—531.
36. Филоненко В. А., Доничев Б. Г., Лихтман Л. Е. Механизм адгезии в системах металл—диэлектрик//Журнал физической химии. 1976. Т. 2. № 3.
37. Владимиров С. Н. // Электронная техника. 1972. Вып. 4(52). 28.
38. Collins L. E., Perkins J. A., Strong P. T. Effects ion bombardment on the adhesion of aluminium films on glass//Thin solid films. 1969. № 4. P. 41—45.
39. Борисенко Ю. П., Грицына В. Т. Влияние ионной бомбардировки на адгезию медных пленок к стеклу//В сб.: Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. — Харьков. 1976. Ч. II. С. 43—45.
40. Chapman B. N. Thin — film adhesion//J. Vac. Sei. Technol. 1974. V. 11. № 1. P. 106—113.
41. Strong P. T. Ion bombardment and implantation and their application to thin films//Thin solid films. 1972. № 11. P. 1.
42. Борисенко Ю. П., Грицына В. Т., Першин В. Ф. Влияние облучения ионами Н⁺ на адгезию серебряных пленок к стеклу//В сб.: Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. — Киев, 1974. № 1. С. 142—144.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2006 г.

Contemporary conception about the possible mechanisms of adhesion of metallic films to different films

A. G. Shautsukov

Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

In the review hereby there has been considered the descriptions (characters) of interphase interaction in the bound of metal to metal, metal dielectric and nature and the mechanism of the contact interaction of metal with different films; the conformities of adhesion processes, the influence of different factors on the quantity of adhesion.